

DOI: 10.7652/xjtuxb201302017

磁力配重型在线自动平衡头的作动原理研究

樊红卫, 景敏卿, 王仁超, 刘恒

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 从转子在线自动平衡的基本原理入手,提出了自动平衡头的质量块运动方案。基于电磁-永磁混合驱动思想,设计了以环形通电线圈和稀土永磁材料为激励的平衡头磁路结构。介绍了平衡头作动过程,基于此给出了阶跃型驱动电压波形。针对 170MD12Y16 高速磨削电主轴,设计了平衡头具体结构,通过有限元电磁场仿真,确定了合适的线圈安匝数和磁阻调整环厚度;通过驱动试验,验证了仿真结果的正确性并确定了合适的电压及其持续时间。研究表明,当安匝数为 1 kA、磁阻调整环厚度为 0.2 mm、驱动电压为 12.4 V 且占与空时间均为 120 ms 时,平衡头运转平稳。

关键词: 自动平衡头;作动原理;电磁场仿真

中图分类号: TH113.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)02-0097-06

Actuating Principle of Online Automatic Balancer with Counter Weight Driven by Magnetic Force

FAN Hongwei, JING Mingqing, WANG Renchao, LIU Heng

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Kinematic precept of mass block in automatic balancer is proposed following the principle of online automatic dynamic balancing. By combination of electromagnet and permanent magnet, the magnetic circuit of the balancer with ring coil and rare earth permanent magnet is designed. Actuating process of the balancer is discussed and then a step drive voltage waveform is defined. For the high-speed grinding motorized spindle 170MD12Y16, the mechanical structure and dimensions of the balancer are schemed out. The electromagnetic simulations for the designed balancer are conducted and the better coil ampere-turns and reluctance adjusting ring thickness are then determined. The validity of simulation results is verified by a balancer driving experiment and the desired voltage value and its duration time are also determined. the designed balancer has a stable operation process without out-of-step and fluctuation around balanced position when the ampere-turns are considered as 1 kA, the reluctance adjusting ring thickness 0.2 mm, the driving voltage 12.4 V and the voltage duration time 120 ms.

Keywords: automatic balancer; actuating principle; electromagnetic simulation

旋转机械在其设计、制造、使用 and 维修过程中,难免存在轴系质量分布不均。当转子高速旋转时,微小的质量分布不均会引起极大的惯性离心力,从

而激起强烈的振动,严重影响机器的工作质量和使用寿命,因此对高速、精密旋转机械进行高精度的动平衡具有重要意义。传统平衡机上的动平衡为离线

收稿日期: 2012-06-21。 作者简介: 樊红卫(1984—),男,博士生;景敏卿(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2010ZX04012-014)。

网络出版时间: 2012-12-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121223.1637.004.html>

平衡,未计及实时工况对平衡状态的影响,只能作为机器的预平衡。经典现场动平衡需要多次反复停机和人工试重,平衡效率低,会对连续工作的大型电力和化工等设备造成较大的经济损失,在对加工中心等质量分布频繁变化的场合又难以适用。近几十年发展起来的具有实时监测和主动平衡能力的在线自动平衡无需停机、无人干预、无停机经济损失,是一种高精度的智能动平衡方法。在线自动平衡的核心技术是自动平衡头和动平衡算法,其中对平衡头的研究相对较少。

平衡头研究的关键在驱动原理。目前常见的平衡头主要有电机驱动齿盘式机械平衡头^[1-2]、基于液压驱动的喷液平衡头^[3]及改进后的释液平衡头^[4]、仿步进电机的电磁平衡头^[5-6]等。其中,机械平衡头由于需要高性能微特电机、碳刷易磨损、机械零件较多等问题,难以用于高转速场合;喷/释液式平衡头需要一套液压系统,停机后平衡状态无法保持,平衡效率不高;仿步进电机式电磁平衡头结构较复杂,需外加摩擦离合器保持平衡状态,且轴向尺寸较大。

在平衡头中引入永磁体从而简化驱动,且无需外加自锁机构,使磁能在动静件中共存的电磁环形平衡头较早出现在文献[7]中。文献[8]对电磁环形平衡头控制算法进行了深入研究,并在 20 000 r/min 下完成了磨床主轴动平衡试验;文献[9]针对加工中心主轴,研究了该平衡头的控制算法,并在 16 000 r/min 下完成了动平衡试验;文献[10-11]率先在国内开展了该平衡头的探索工作,内容涉及平衡头设计计算、控制算法仿真和动平衡试验等。

本文从平衡原理入手,提出电磁-永磁混合的圆环形平衡头磁路结构,采用电磁场数值仿真评价设计的合理性,通过试验验证平衡头的驱动能力和运动平稳性,为平衡头开发应用提供理论基础和技术支持。

1 在线自动动平衡原理

1.1 自动平衡方程

设转子-轴承系统在不平衡激励作用下为一 n 自由度系统,用以下方程描述

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 为系统的质量阵、阻尼阵和刚度阵; $\mathbf{F}(t)$ 为不平衡激励力,当某一坐标方向无不平衡力时,对应分量为 0。

在自动平衡时,需要在 k 个轴截面上安装 k 个平衡头,平衡头转动即产生补偿力 $\tilde{\mathbf{F}}(t)_{k \times 1}$ 。此时,

系统的动力学方程表达为

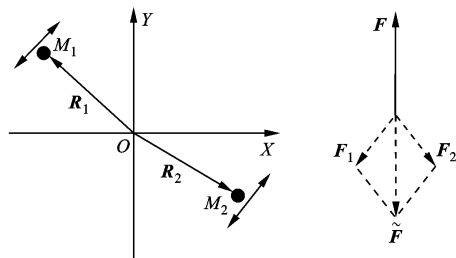
$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}(t) + \mathbf{P}_{n \times k} \tilde{\mathbf{F}}(t)_{k \times 1} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{P}_{n \times k}$ 为平衡头的位置矩阵,有平衡头处对应分量为 1,没有为 0。

对于砂轮-电主轴刚性组合转子,质量不平衡通常发生在砂轮端,故只需在砂轮附近安装一个平衡头即可实现在线自动平衡。

1.2 配重质量块移动方案

在平衡头设计时,以何种方式移动配重质量块以获得与 $\mathbf{F}$ 大小相等、方向相反的 $\tilde{\mathbf{F}}$ 是一个基础问题。如图 1 所示,双配重固定半径极坐标运动具有运动简单、容易控制等优点,故本文的平衡头采用两组独立的配重盘和驱动线圈,两组独立线圈分别驱动平衡头内的两个独立的配重盘。这两个配重盘在电磁力矩作用下各自转动到一定位置后即形成两个不平衡矢量,这两个矢量合成得到一个有效补偿矢量,该矢量与轴的原始不平衡矢量相抵消以实现轴的质量重新均匀分布,即动平衡。



(a) 质量块移动原理 (b) 矢量补偿原理

图 1 自动平衡头质量块移动原理

如图 1a 所示,平衡头带有两个独立运动的质量块 M_1 和 M_2 ,且 $M_1 = M_2$ 、 $\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_2$, M_1 和 M_2 绕同一回转中心 O 转动。动平衡时, M_1 和 M_2 转到预定位置后停转并自锁,此时 M_1 和 M_2 分别形成各自的补偿矢量 $\tilde{\mathbf{F}}_1$ 和 $\tilde{\mathbf{F}}_2$,二者叠加得到合力 $\tilde{\mathbf{F}}$ 。

2 平衡头磁路及驱动设计

2.1 平衡头磁路设计

采用环形带芯线圈和稀土永磁体,构成如图 2 所示的平衡头驱动磁路结构。这里,假设磁路沿逆时针闭合。

图 2 给出的是平衡头单配重盘单边轴截面驱动磁路结构示意图。由图可知,平衡头由定子和转子两部分组成,定子由铁芯、环形线圈和磁阻调整铝环组成,转子由内齿状磁性盘、圆柱形永磁体、不锈钢隔磁环等组成。工作时,环形线圈通电产生磁场,磁

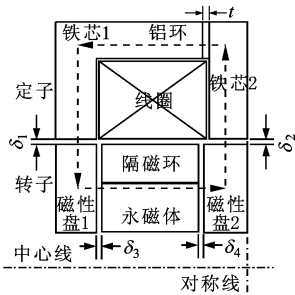


图 2 电磁-永磁混合的平衡头驱动磁路结构

场在包围它的铁芯内强化后穿过定子和转子间的气隙,将磁性盘 1、2 磁化,使磁性盘与永磁体通过“同性相斥、异性相吸”相互作用,进而推动配重盘转动。配重盘携带的质量可通过打孔、镶嵌重金属以及二者的组合等多种方式实现,不进行平衡时它和轴之间无相对转动,平衡时它相对轴转动。线圈、配重盘和磁性盘的结构如图 3~图 5 所示。

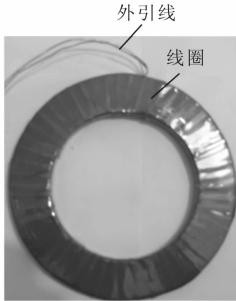


图 3 环形线圈



图 4 带永磁体的配重盘

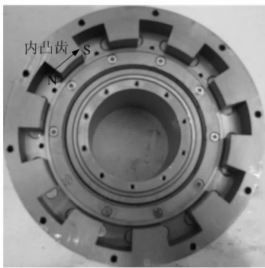


图 5 平衡头及内齿状磁性盘

线圈设计成扁平的圆环结构,采用 $\Phi 1.12\text{ mm}$ 的圆铜漆包线密绕 324 匝,工作时两端加以正反相间的阶跃电压。配重盘上 20 个圆柱形永磁体沿周向等间距布置,相邻两个永磁体的极性相反。磁性盘为内齿结构,凸齿和齿槽轮廓为矩形,齿厚等于两相邻永磁体的间距,齿高大于永磁体直径。图 5 是平衡头的实物图(未装端盖),可以清晰地看出磁性盘和配重盘处于磁阻最小位置,平衡状态得以保持。

2.2 平衡头运动过程和受力分析

当线圈两端加以图 6 所示的阶跃型电压信号

时,配重盘沿一个方向连续转动。在启动位置,配重盘的受力如图 7 所示。

图 6 中, T_1 为正电压持续时间, T_3 为负电压持续时间, T_2 和 T_4 为断电持续时间, $T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow T_4$ 完成同方向连续两步的转动。

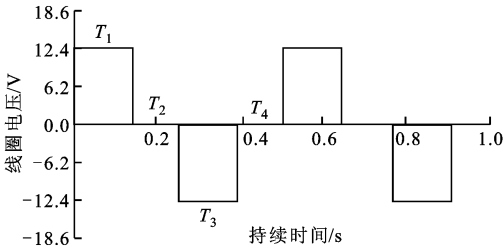


图 6 线圈驱动电压波形

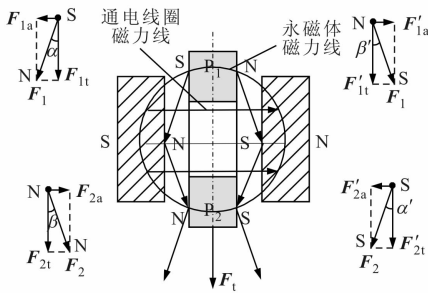


图 7 启动位置处配重盘受力分析(周向展开图)

如图 7 所示, F_t 为线圈通电时 (T_1 阶段) 永磁体与两侧磁性盘之间作用合力 F 的切向分量,是配重盘转动的有效驱动力; α 、 α' 、 β 、 β' 是左侧吸力、右侧吸力、左侧斥力、右侧斥力与各自的切向分量之间的夹角。配重盘在 F_t 的作用下向下运动,当永磁体 P_1 运动至如图 8 所示的中心位置时,驱动力 $F_t \approx 0$ 。

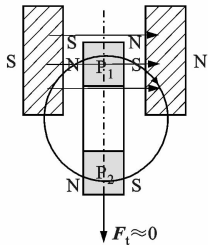


图 8 中心位置处配重盘受力分析(周向展开图)

永磁体 P_1 运动过程中,驱动力 F_t 一直在逐渐减小,即配重盘的运动规律为加速度越来越小的加速运动。经过如图 8 所示的中心位置后,线圈驱动配重盘做减速运动,直到下一个稳定位置并自锁,线圈断电 (T_2 阶段),配重盘在自身惯性及自锁力作用下继续向下一个稳定位置运动。到达下一个稳定位置后,线圈两端又获得反极性电压信号 (T_3 阶段),

此时配重盘沿同一方向继续转动,如此反复变换电压极性,使配重盘沿一个方向连续运动若干步。

3 平衡头电磁场仿真

3.1 平衡头设计参数

根据 ZYS-170MD12Y16 高速磨削电主轴的轴端尺寸和空间大小,本文自主设计了平衡头的结构尺寸见图 9,参数见表 1。

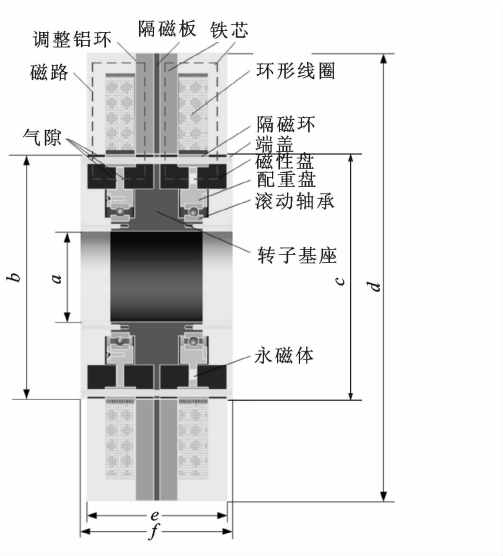


图 9 平衡头结构

表 1 平衡头参数

参数名称	参数符号	参数取值
转子内径	a	45
转子外径	b	121
转子厚度	f	75
定子内径	c	121.4
定子外径	d	221.4
定子厚度	e	69
定转子间双边气隙	δ_1, δ_2	0.4
磁性盘与永磁体间气隙	δ_3, δ_4	0.1~0.2
磁阻调整铝环厚度	t	0.1~0.3

在满足磁性能要求的前提下,铁磁材料采用优质 10 号钢;为减小体积和质量,永磁材料采用 Nd-FeB-40M;静、动件的非磁材料分别采用 LY12、1Cr18Ni9。

3.2 平衡头磁场仿真与力矩计算

在进行磁场仿真时,对平衡头结构做必要简化:①将配重孔、螺纹连接件按实体处理,设为非磁材料;②为减小计算量,三维分析采用 1/10 模型,用主从边界条件等效;③计算磁力时以一对永磁体为对

象,按永磁体对数对驱动力近似计算;④对磁性材料属性,均按线性磁化处理。

在磁极面积一定的情况下,影响驱动磁路的主要参数为线圈安匝数和磁阻调整环厚度 t 。图 10、图 11 为安匝数和 t 取不同值时平衡头的磁通密度矢量 B 的分布情况。从图 10 可以看出,随着安匝数增加,磁通密度 B 增大,从磁路饱和与漏磁看,安匝数为 1 000 A 较合理。从图 11 可知,磁阻调整环能够对磁路进行有效调整,从而避免漏磁与饱和,安匝数为 1 000 A 且调整铝环厚度 $t=0.2$ mm 时磁路较理想。综合以上分析,选取安匝数为 1 000 A、铝环厚度 $t=0.2$ mm。

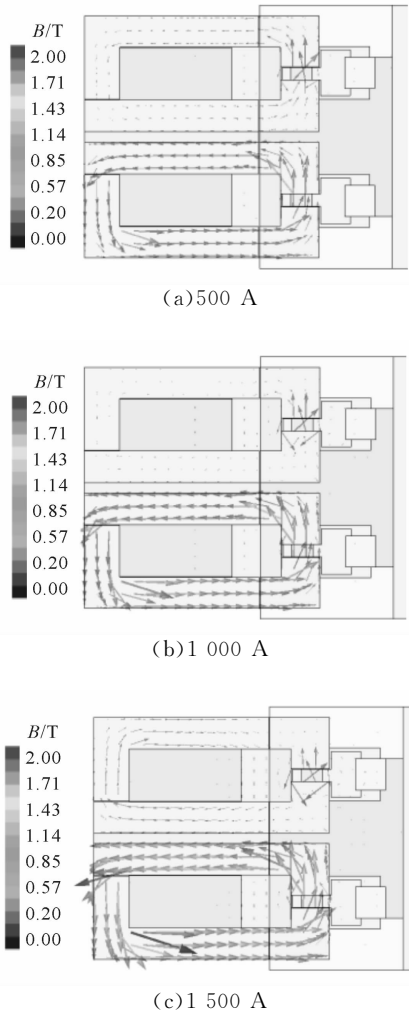


图 10 $t=0.2$ mm、不同安匝数时的磁通密度矢量分布

为计算驱动力矩,建立平衡头三维 1/10 模型,对模型施加主从边界条,对两组线圈均施加绝缘边界条件。永磁激励以材料属性形式施加,其剩磁 $B_r=1.31$ T、矫顽力 $H_{cb}=1\,019$ kA/m;电磁激励以总电流形式施加,取安匝数为 500 A、1 000 A、1 500 A。

采用稳态电磁场计算驱动力矩,将平衡头一个

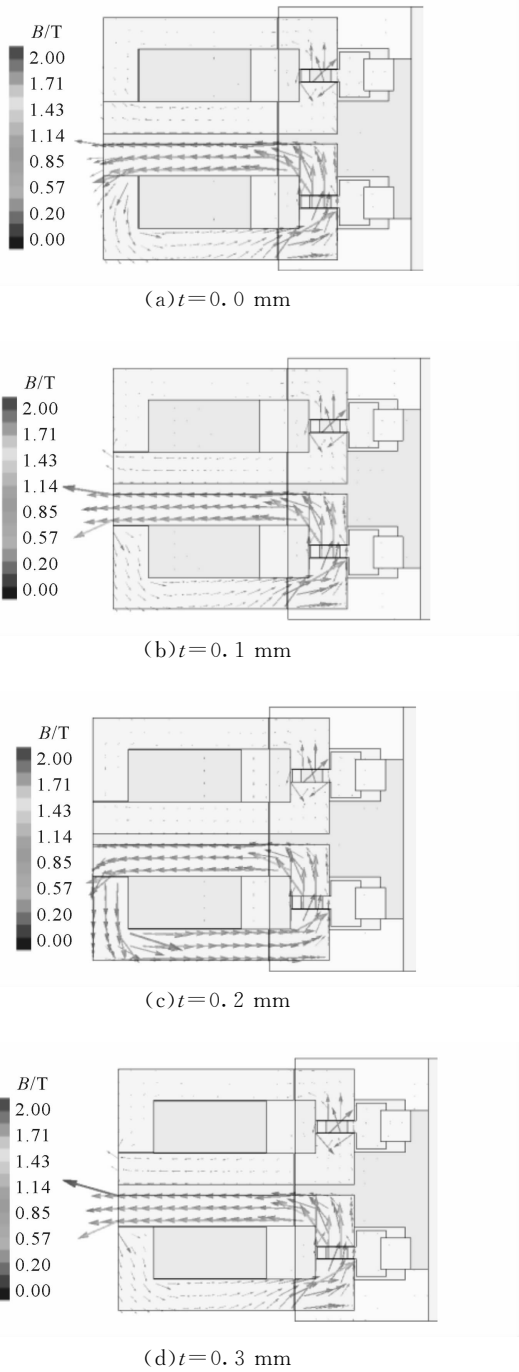


图 11 安匝数为 1 000 A、不同铝环厚度时的磁通密度矢量分布

步距(相邻两个永磁体之间的距离)等分为 18 个子步,即每转过 1°计算一次驱动力矩(驱动安匝数保持不变)。仿真得到的驱动力矩曲线如图 12 所示。

图 12 中, B 点为电磁驱动力矩零点(见图 8), A 点和 C 点为永磁体整体进入磁性盘凸齿的位置。从图 12 可以看出力矩的变化规律:在 B 点之后,力矩反向增大;在 B 点之前,当永磁体 P_1 全部进入磁性盘凸齿、 P_2 完全离开当前磁性盘凸齿时,力矩会

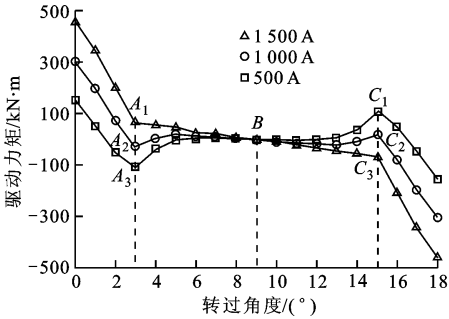


图 12 平衡头一对永磁体稳态驱动力矩曲线

明显减小,即出现 A 点;在 B 点之后,当永磁体 P_1 将要离开磁性盘凸齿、 P_2 将要进入下一个磁性盘凸齿时,力矩会明显增大,即出现 C 点。此外,从图 12 可知,当安匝数较小时,驱动力矩也较小,有可能无法驱动配重盘越过中心位置而被自锁力矩拉回到前一稳定自锁位置,从而出现在原稳定位置附近“抖动”的现象;当安匝数较大时,驱动力矩虽增大,但有可能过快地越过临界位置后在下一稳定位置附近“抖动”。因此,在设计驱动电路时,需要确定最佳的稳定驱动电压值。

3.3 平衡头驱动平稳性试验

基于以上分析,如图 13 所示,将自主开发的平衡头安装在一根阶梯轴上。为方便观察作动过程,

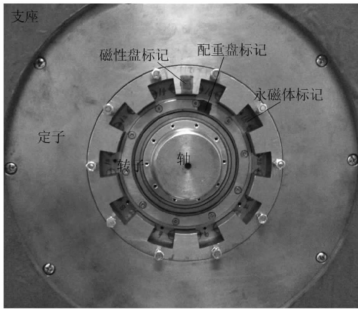


图 13 平衡头前端面

将永磁体、磁性盘和配重盘用记号笔标出。为获得无抖动的理想驱动电压值,对平衡头线圈施加阶跃电压,取 $T_1 = T_2 = 120\text{ ms}$,试验结果见表 2。

表 2 驱动平稳性试验结果

驱动电压/V	平衡头运动状态
9.8	静止
10.4	微动
10.7	在自锁位置抖动
11.6	转动,有抖动
12.4	转动,平稳
13.2	转动,有抖动

如表 2 所示,随着驱动电压不断增大,平衡头从

静止状态开始转动。当驱动电压为 12.4 V 时,平衡头转动平稳,此时计算可知通过线圈的电流约为 3.5 A,总安匝数为 1 134 A。当平衡头一侧配重盘固定、另一侧配重盘按步转动(即采用单盘平衡策略)时,可得到如表 3 所示的配质量结果。

表 3 平衡头配质量

代号	配重盘位置	配质量/g·cm
0-0	两盘相差 180°	0.00
0-1	—盘转动 18°	0.78
0-2	—盘转动 36°	1.54
0-3	—盘转动 54°	2.26
0-4	—盘转动 72°	2.93
0-5	—盘转动 90°	3.53
0-6	—盘转动 108°	4.03
0-7	—盘转动 126°	4.44
0-8	—盘转动 144°	4.74
0-9	—盘转动 162°	4.93
0-10	两盘重合	4.99

如表 3 所示,本文设计的平衡头在转动过程中可形成 10 个离散配质量,应用中根据被平衡对象的不平衡量 U ,将平衡头转动到配质量最接近 U 的位置,即实现动平衡。

4 结 论

(1)根据在线自动平衡的原理和平衡头质量块移动方案,设计了平衡头的磁路,分析了平衡头的作动过程和受力情况,给出了驱动电压波形,为平衡头的电磁场仿真和驱动试验提供了必要基础。

(2)针对 ZYS-170MD12Y16 高速磨削电主轴,设计了平衡头具体结构尺寸,完成了电磁场分析,获得了理想线圈安匝数和磁阻调整环厚度,计算了不同安匝数下稳态驱动力矩,通过驱动试验确定了平衡头平稳运行电压。结果表明:当安匝数为 1 000 A、磁阻调整铝环厚度为 0.2 mm、驱动电压为 12.4 V、通断电持续时间为 120 ms 时,所设计的平衡头运转平稳,无抖动、不丢步。

参考文献:

[1] VAN DE VEGTE J. Continuous automatic balancing of rotating systems [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1964, 6(3): 264-269.

[2] VAN DE VEGTE J, LAKE R T. Balancing of rotating systems during operation [J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 57(2): 225-235.

[3] 周保堂,贺世正,王宇,等. 在线自动平衡的平衡头研究 [J]. 石油化工设备技术, 1994, 15(3): 42-45.
ZHOU Baotang, HE Shizheng, WANG Yu. Study on balancer for online automatic dynamic balancing [J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 1994, 15(3): 42-45.

[4] 贺世正. 释放液体式自动平衡头的研究 [J]. 浙江大学学报:工学版, 2001, 35(4): 418-422.
HE Shizheng. Study of liquid release auto-balancing head [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2001, 35(4): 418-422.

[5] 欧阳红兵,汪希萱. 两种新型电磁式在线自动平衡头 [J]. 机械制造, 2002, 40(7): 47-48.
OUYANG Hongbing, WANG Xixuan. Two types of new electromagnetic online automatic balancer [J]. Machinery, 2002, 40(7): 47-48.

[6] 葛哲学,陶利民. 新型电磁式自动平衡装置的研究 [J]. 机械, 2001, 28(6): 62-64.
GE Zhexue, TAO Limin. Study on a new electromagnetic automatic-balancing instrument [J]. Machinery, 2001, 28(6): 62-64.

[7] HILDEBRAND S, MILLER L. Rotating machine active balancer and method of dynamically balancing a rotating machine shaft with torsional vibrations: USA, 7717013B2 [P]. 2010-05-18.

[8] DYER S W. Adaptive optimal control of active balancing systems for high-speed rotating machinery [D]. Detroit, USA: University of Michigan, 1999.

[9] MOON J D, KIM B S, LEE S H. Development of the active balancing device for high-speed spindle system using influence coefficients [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(9): 978-987.

[10] 刘锦南. 电磁式自动平衡系统的实验研究及其在超重力机中的应用 [D]. 北京: 北京化工大学, 2006.

[11] 沈伟. 旋转机械主动平衡技术及工程应用 [D]. 北京: 北京化工大学, 2006.

[本刊相关文献链接]

马石磊,裴世源,王琳,等. 采用新型电磁动平衡装置的动平衡研究. 2012,46(3):21-26.

章云,梅雪松,邹冬林,等. 应用动力学模型的高速主轴无试重动平衡方法. 2011,45(7):34-37.

张明书,徐自力,漆小兵,等. 大型动压滑动轴承动特性系数辨识研究. 2010,44(7):75-78.

许鹏,曹秉刚,曹建波,等. 两轮独立驱动电动车的转矩协调控制. 2009,43(7):53-57.

(编辑 杜秀杰)